

УДК 539.3

**И.Я.ХРАМЦОВА, А.Н.ТКАЧУК, Н.А.ТКАЧУК**, докт. техн. наук,  
НТУ “ХПИ”, **С.Т.БРУЛЬ**, Центральное бронетанковое управление  
Вооружения Главного управления логистики Командования сил  
поддержки Вооруженных Сил Украины,  
**Е.А.ОРЛОВ**, Изюмский тепловозоремонтный завод, г. Изюм,  
**А.Д.ЧЕПУРНОЙ**, докт. техн. наук, “Головной специализированный  
конструкторско-технологический институт”, г. Мариуполь

## **СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА И СИНТЕЗА И РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЕСС-ФОРМ**

Описано методи розрахунково-експериментального дослідження напружено-деформованого стану прес-форм. Створена модульна структура системи автоматизованого проектування прес-форм. Наведені результати розрахунків та експериментів.

The methods of computational and experimental research of stressed-deformed state of press moulds are described. The modular construction of CAD-system for press moulds is created. The results of calculations and experiments are given.

**Введение.** Пресс-формы (ПФ) являются одним из наиболее сложных по структуре видом технологической оснастки для изготовления деталей машиностроительных конструкций. При оснащении термопластавтоматов проектируемыми пресс-формами возникает задача предварительного исследования напряженно-деформированного состояния пресс-форм при действии: усилий замыкания ПФ; давления расплавленного материала, заполняющего формообразующие полости; усилий предварительной затяжки болтов, винтов в ПФ; усилий контактного взаимодействия элементов конструкции при их совместном деформировании в процессе эксплуатационных нагрузок.

Поскольку деформация полуматриц, пуансонов, подкладных плит, опор пресс-форм в конечном счете приводит к изменению взаимного их расположения, формы и размеров изготавливаемых деталей, то прочностные и жесткостные характеристики пресс-форм самым непосредственным образом оказывают влияние на точность и качество поверхности данных деталей. В частности, при деформации пуансонов и полуматриц ПФ может происходить раскрытие стыка по плоскости разреза, что, в свою очередь, может привести к образованию облоя и искажению формы деталей.

Поскольку пресс-форма состоит из множества элементов, то ее свойства во многом определяются характером контактного взаимодействия по поверхностям разреза и сопряжения. В соответствии с этим особое внимание при исследовании напряженно-деформированного состояния (НДС) пресс-форм следует уделить контактирующим парам.

**Постановка задачи.** Анализ конструкций и условий эксплуатации пресс-форм позволяет выделить следующие задачи:

1. разработка подсистемы автоматизированного исследования прочности, жесткости элементов пресс-форм и оптимизации конструктивных параметров ПФ в составе комплексной системы автоматизированного проектирования;

2. численное исследование влияния конструктивных схем на прочностные и жесткостные характеристики полуматриц пресс-форм;

3. численное исследование влияния количества формирующих гнезд на напряженно-деформированное состояние полуматриц пресс-форм;

4. экспериментальное исследование влияния конструктивных и технологических параметров на напряженно-деформированное состояние ПФ;

5. разработка специализированной интегрированной системы автоматизированного анализа прочности и жесткости пресс-форм.

С применением методов и систем автоматизированных исследований, предложенных авторами, указанные исследования реализованы в виде комплекса программ, методик, расчетов и экспериментов.

**1. Подсистема автоматизированного анализа и синтеза параметров пресс-форм по критериям прочности и жесткости.** При разработке комплексной системы автоматизированного проектирования пресс-форм “САПР-ПФ” возникла задача оптимизации конструктивных и технологических параметров наиболее нагруженных и ответственных элементов конструкций. “САПР-ПФ” строилась по модульному типу на базе оригинального графического редактора и единой базы данных оборудования, свойств материалов и архива конструкций. В качестве необходимой компоненты в “САПР-ПФ” на основе методов, предложенных авторами, была разработана подсистема рационального выбора конструктивных и технологических параметров элементов пресс-форм. На рис. 1 представлена укрупненная структурная схема “САПР-ПФ”.

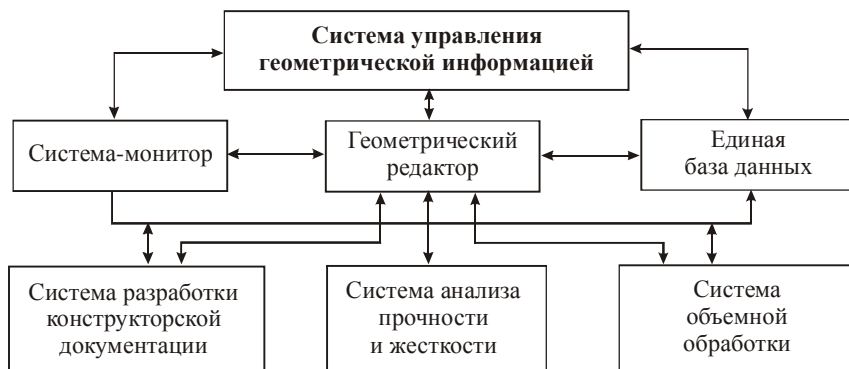


Рис. 1. Подсистемы комплексной “САПР-ПФ”

Основная геометрическая информация для формирования конечно-элементных моделей элементов пресс-форм формируется геометрическим редактором и через специальные форматы данных поступает, в том числе, в подсистему “НДС-ПФ”. Здесь параметрический массив данных преобразуется в систему инструкций для построения конечно-элементных моделей наиболее нагруженных и ответственных деталей пресс-форм. Условия нагружения формируются на основе данных, поступающих из единой базы данных (рис. 2).

Расчет напряженно-деформированного состояния служит основой для выбора рациональных конструктивных и технологических параметров пресс-форм. В табл.1 приведены иллюстрации работы отдельных модулей “САПР-ПФ”, создаваемые модели и форма представления результатов.

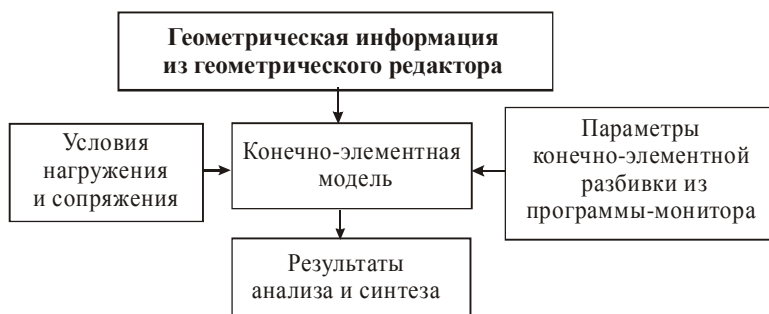

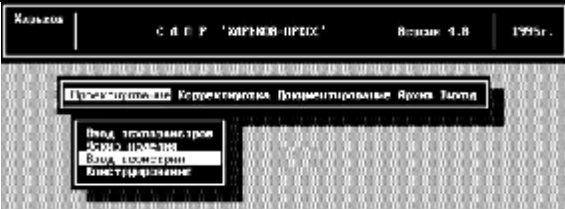


Рис.2. Формирование конечно-элементных моделей элементов пресс-форм

Таблица 1  
Отдельные этапы проектирования пресс-форм в “САПР-ПФ”

Название этапа	Результаты выполнения
Общие этапы проектирования пресс-формы	
Параметризация геометрии	

<p><b>Задание</b></p> <p>свойств материала</p>	<div style="text-align: center;"> <b>ВООД ПАРАМЕТРОВ СЛПР ПРЕСС-ФОРМЫ ВЫБОР МАТЕРИАЛА МАТРИЦЫ И ЗНАКОВ</b>  <small>НАИМЕНОВАНИЕ: КОДИФИКАЦИЯ:</small> </div> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Сталь 40X13</th> <th>ГОСТ 4543-71</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Сталь 40Х</td> <td>460</td> </tr> <tr> <td>Сталь 50ХН</td> <td>275</td> </tr> <tr> <td>Сталь 50Н</td> <td>270</td> </tr> <tr> <td>Сталь 50Н</td> <td>340</td> </tr> <tr> <td>Сталь 50Н</td> <td>960</td> </tr> <tr> <td>Сталь 50Н</td> <td>1100</td> </tr> <tr> <td>Коэффициент Пуассона</td> <td>0,200</td> </tr> <tr> <td>Радиус закругления</td> <td>210000</td> </tr> </tbody> </table> <p>Стр. 12-2</p>	Сталь 40X13	ГОСТ 4543-71	Сталь 40Х	460	Сталь 50ХН	275	Сталь 50Н	270	Сталь 50Н	340	Сталь 50Н	960	Сталь 50Н	1100	Коэффициент Пуассона	0,200	Радиус закругления	210000
Сталь 40X13	ГОСТ 4543-71																		
Сталь 40Х	460																		
Сталь 50ХН	275																		
Сталь 50Н	270																		
Сталь 50Н	340																		
Сталь 50Н	960																		
Сталь 50Н	1100																		
Коэффициент Пуассона	0,200																		
Радиус закругления	210000																		
<p>Запуск подсистемы исследования напряженно-деформированного состояния</p>																			
<p>Модель пресс-формы</p>																			
<p>Форма представления распределения перемещений полуматрицы ПФ</p>																			

системой САПР-ПФ, полностью использует преимущества единой базы данных и позволяет в режиме и условиях реального проектирования определять рациональные конструктивные решения и параметры пресс-форм. Создаваемый в единой базе архив параметризованных геометрических и конечно-элементных моделей служит основой для создания *базы знаний* по оптимальному высокооперативному проектированию конструкций данного класса. Разработанный программный комплекс является основой для разработки отечественных специализированных CAD/CAM/CAE-систем.

**2. Подсистема оперативного анализа жесткости полуматриц пресс-форм.** Наиболее ответственными элементами пресс-форм являются полуматрицы, в формующих полостях которых происходит формообразование изделий. Рабочий материал под высоким давлением подается в полость полуматриц. Происходит их деформация. На первых этапах проектирования возникает проблема выбора конструктивных решений, которые обеспечивают нераскрытие стыков в сопряжении полуматриц. Для решения этой задачи создана система оперативного многовариантного анализа НДС полуматриц пресс-форм.

#### **Расчетные схемы полуматриц пресс-форм.**

Расчетные схемы полуматриц пресс-форм строятся на основе анализа взаимодействия элементов пресс-формы (рис. 3). Полуматрица 8 закреплена на жестком основании (плиты 4,2) и испытывает по сравнению с полуматрицей 7 значительно меньшие деформации, следствие чего в дальнейшем при оперативном многовариантном анализе напряженно-деформированного состояния элементов пресс-форм рассматривается напряженно-деформированное состояние только полуматрицы 7. Последняя может закрепляться на подкладной плите различными способами.

Варианты трех схем закрепления полуматрицы 7 на плите 3 показаны на рис. 4:

- вариант 1 соответствует свободному опиранию полуматрицы 7, зафиксированной обоймой 5, на подкладной плите 3 (см. рис. 3);
- вариант 2 соответствует закреплению полуматрицы при помощи наклонных винтов, расположенных в обойме (по два с каждой стороны) и создающих усилия прижима полуматрицы к плите и усилия ее обжатия;

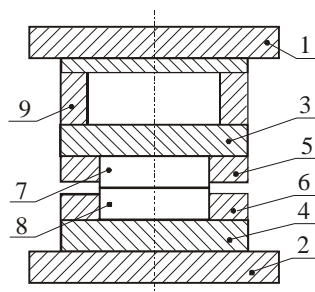


Рис.3. Схема взаимодействия элементов пресс-формы:

- 1 — подвижная плита литейной машины; 2 — неподвижная плита литейной машины; 3 — подкладная плита; 4 — плита; 5, 6 — обойма; 7, 8 — полуматрицы; 9 — опоры

- вариант 3 соответствует закреплению полуматрицы при помощи обоймы 5, выполненной в виде прижимных планок.

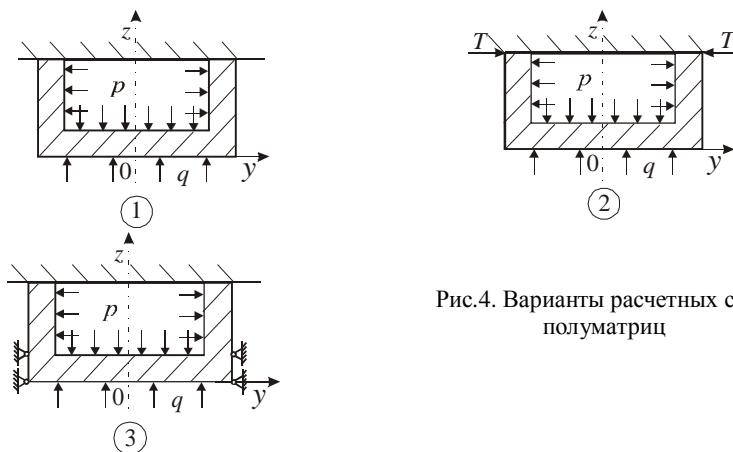


Рис.4. Варианты расчетных схем полуматриц

На полуматрицу со стороны подкладной плиты действует равномерно распределенное давление  $q$ , внутренняя ее часть находится под действием давления  $p$  рабочего тела. По плоскости  $z = \gamma_1$  (рис. 5) исследуемая полуматрица взаимодействует с полуматрицей, размещенной на неподвижной жесткой плите. В силу отмеченных особенностей деформирования последней граничные условия на плоскости сопряжения полуматриц имеют вид:

$$u_z \leq 0, \quad (1)$$

где  $u_z$  – перемещения точек полуматрицы в направлении оси  $z$ .

Данное выражение определяет условие непроникновения подвижной полуматрицы в неподвижную.

Указанные нагрузки и граничное условие (1) определяют вариант 1 расчетной схемы полуматрицы. Вариант 2 отличается от варианта 1 приложением обжимающих нагрузок  $T$  (по два усилия с каждой стороны). Вариант 3 отличается от варианта 1 наличием ограничений на перемещения

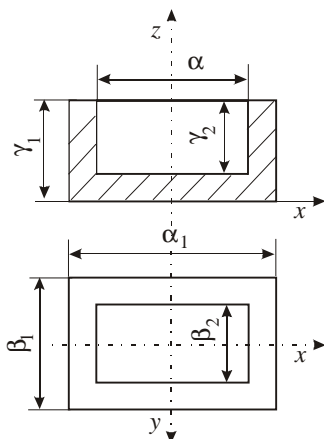


Рис.5. Основные конструктивные параметры полуматрицы

закрепленных прижимными планками точек полуматрицы в плоскости  $Oxy$  (см. рис. 4). Таким образом, для определения напряженно-деформированного состояния полуматриц пресс-форм необходимо решить пространственную контактную задачу теории упругости. Для ее решения была использована методика, изложенная в работах [1-11] на основе теории вариационных неравенств.

Для дискретизации задачи привлечен метод конечных элементов с конечными элементами в форме параллелепипеда. Предложенный алгоритм реализован в виде комплекса программ и использован при решении ряда задач об определении напряженно-деформированного состояния элементов перенастраиваемой технологической оснастки [12-21].

Анализ расчетных схем позволяет выделить следующие основные параметры, определяющие прочностные и жесткостные характеристики полуматриц пресс-форм: схема закрепления полуматрицы на подкладной плите; величина обжимаемых усилий (схема 2 закрепления полуматрицы), а в качестве основных задач исследований – определение их влияния на прочность и жесткость полуматриц.

**2. Методика и результаты исследований моделей полуматриц пресс-форм.** Предлагается следующий вариант, реализующий предложенную в работе схему расчетно-экспериментальных исследований элементов механических систем и предполагающий следующие этапы.

1. Создание пробной расчетной модель объекта (*модель первого уровня*) с использованием специализированной или универсальной системы автоматизированного проектирования (см. рис.1, 2, табл. 1).

2. Проведение численного исследования объекта.

3. Проведение экспериментального исследования объекта. Сравнение результатов численных и экспериментальных исследований и определение значимых факторов модели.

4. Корректировка структуры и параметров расчетных моделей объекта (*модель второго уровня*).

5. Проведение повторного численного исследования объекта.

6. Корректировка расчетной *модели третьего уровня*.

7. Проведение численных исследований объекта с различным набором конструктивных и эксплуатационных параметров. Расчет значений параметров, обеспечивающие необходимый уровень прочности и жесткости.

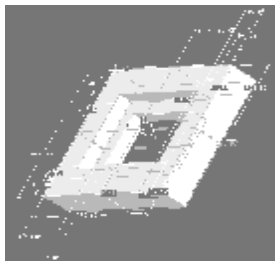
8. Корректировка исходной модели в САПР.

9. Создание конечно-элементных моделей и подсистемы для углубленного анализа напряженно-деформированного состояния пресс-формы как системы взаимодействующих элементов.

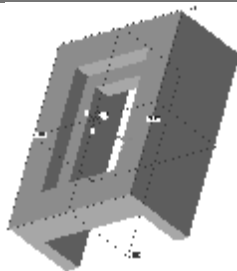
Разработанные математические модели и программный комплекс были использованы в процессе многовариантных исследований опытных образцов пресс-форм. Исследовалось влияние конструктивных и технологических факторов на напряженно-деформированное состояние полуматриц пресс-

форм. В процессе исследований напряженно-деформированного состояния полуматриц пресс-форм использовались следующие значения их основных конструктивных параметров (см. рис.5):  $\alpha_1=240$  мм,  $\alpha_2=160$  мм,  $\beta_1=480$  мм,  $\beta_2=400$  мм,  $\gamma_1=60$  мм,  $\gamma_2=20$  мм, модуль упругости материала полуматрицы  $E=2,1 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu=0,28$ . Примеры конечно-элементных моделей полуматриц приведены на рис.6.

*Модель первого  
уровня*



*Модель второго  
уровня*



*Модель  
третьего уровня*

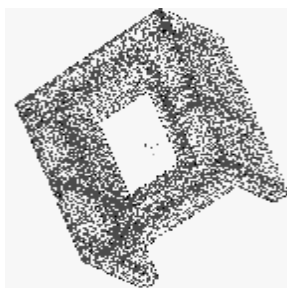
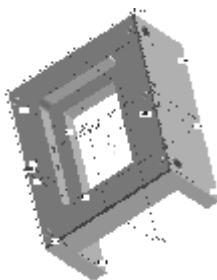


Рис.6. Примеры и фрагменты конечно-элементных моделей пресс-форм, построенные с использованием специализированной системы автоматизированного проектирования САПР-ПФ и системы Pro/ENGINEER

Усилие закрытия пресс-формы принималось равным 1,0 МН, давление рабочего тела  $p=100$  МПа. Усилие обжатия полуматрицы пресс-формы  $T$  принималось равным 20, 40, 60, 80 кН. Расположение характерных точек



полуматрицы пресс-формы показано на рис.7.

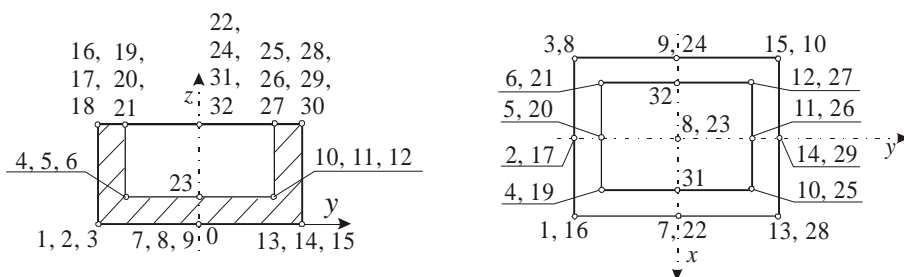


Рис.7. Характерные точки полуматрицы

На рис.8, 9 приведены характерные точки полуматрицы и схемы деформирования различных сечений полуматрицы (вариант 1 расчетной схемы). Видно, что максимальный прогиб наблюдается в центральной части полуматрицы (124 мкм). Периферийные точки полуматрицы смещены в направлении плоскости сопряжения с другой полуматрицей пресс-формы (см. рис.8, 9). Происходит распирание боковых граней полуматриц, причем максимальные перемещения  $u_x, u_y$  достигаются в сечениях  $y = 0$  мм и  $x = 0$  мм (93 мкм и 105 мкм соответственно).

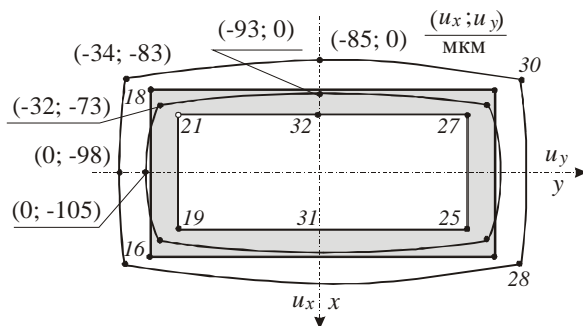


Рис.8. Схема деформирования полуматрицы в плоскости  $z = \gamma_1$  при 1-м варианте граничных условий

На рис.10 представлены схемы деформирования сечения  $y = 0$  мм при различных граничных условиях. Здесь схема а соответствует варианту 3 граничных условий, б - варианту 2 при  $T = 20$  кН, в - варианту 2 при  $T = 80$  кН. Видно, что данные схемы качественно и количественно соответствуют схеме деформирования сечения  $y = 0$  мм полуматрицы при 1-м варианте граничных условий. Небольшое различие картин деформирования

наблюдается только в зоне сопряжения дна и боковых стенок полуматрицы. Количественные характеристики деформированного состояния пресс-форм представлены в табл.2. Здесь  $\Delta_1$  – максимальный прогиб дна полуматрицы,  $\Delta_2$  – максимальное раскрытие стыка по внутреннему контуру зоны сопряжения полуматриц,  $\Delta_3$  – максимальное раскрытие стыка по внешнему контуру зоны сопряжения полуматриц,  $\Delta_4$  – максимальное распирание боковой поверхности полуматриц.

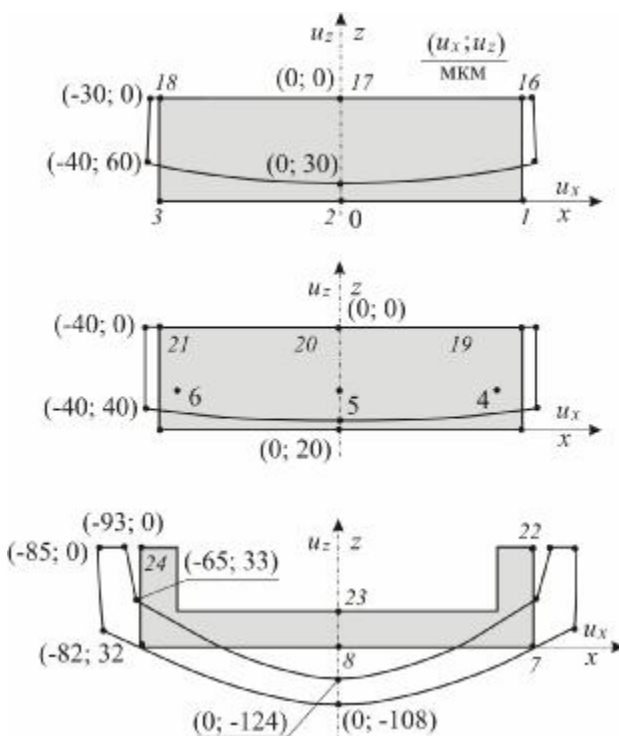


Рис.9. Схема деформирования сечений полуматрицы при 1-м варианте граничных условий

В табл.2 приведены также параметры напряженно-деформированного состояния полуматрицы высотой 40 мм (параметры  $\gamma_1=40$  мм,  $\gamma_2=20$  мм) с вариантом нагружения 1.

Из представленных в табл.2 и на рис.8-10 данных видно, что характер деформирования полуматриц пресс-форм ( $\gamma_1=60$  мм) практически не зависит от варианта расчетной схемы и величины усилий обжатия. Происходит изгиб

днища и распирание боковых граней полуматриц. Максимальный прогиб в центральной части – 124-134 мкм для различных вариантов расчетных схем. Влияние усилий обжатия полуматриц сказывается только непосредственно в зоне их приложения. По контуру плоскости разреза полуматриц раскрытая стыка не происходит.

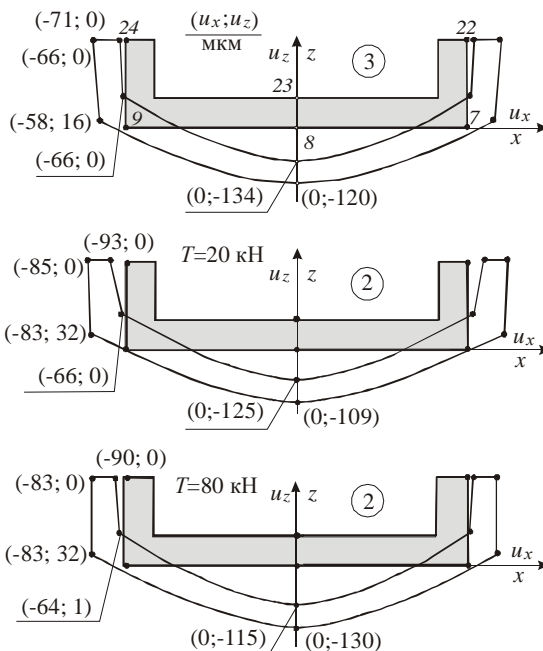


Рис.10. Схема деформирования сечений полуматрицы при различных вариантах граничных условий

Таблица 2

Параметры деформированного состояния исследуемых полуматриц, мкм

Варианты расчетной схемы	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$\Delta_4$
2 $T=20$ кН	125	0	0	98
2 $T=40$ кН	127	0	0	92
2 $T=60$ кН	128	0	0	91
2 $T=80$ кН	130	0	0	90
3	134	0	0	98
1 $\gamma_1=40$ мм	285	93	0	52
1	124	0	0	105

Несколько иная картина деформирования полуматрицы с  $\gamma_1 = 40$  мм. Здесь наблюдается раскрытие плоскости разъема по внутреннему контуру на 93 мкм. Максимальный прогиб днища – 285 мкм.

Таким образом, увеличение высоты полуматрицы с 40 до 60 мм привело к уменьшению прогиба и устранению раскрытия стыка по периферии плоскости разъема полуматриц пресс-форм.

Анализ результатов, полученных при исследовании напряженно-деформированного состояния модельных полуматриц пресс-форм ( $\gamma_1 = 60$  мм) позволяет сделать следующие выводы:

- величина и характер деформирования полуматриц пресс-форм практически одинаковы для различных вариантов их крепления на подкладной плите;
- раскрытия стыка по периферии плоскости сопряжения полуматриц пресс-форм не происходит;
- увеличение высоты полуматрицы с 40 мм до 60 мм приводит к уменьшению прогиба ее днища примерно в 2,0-2,3 раза.

Предложенная система оперативного анализа прочностных и жесткостных характеристик полуматриц пресс-форм позволяет на основе многовариантных расчетов проводить обоснованный выбор конструктивных схем и рациональных параметров, обеспечивающих нераскрытие стыка в сопряжении полуматриц. Это позволяет обеспечивать высокое качество и точность изготовления деталей.

Обоснованность расчетных схем, принятых при оперативном анализе напряженно-деформированного состояния элементов пресс-форм, подтверждаются результатами экспериментальных исследований [14]. Работоспособность разработанной системы оперативного анализа прочности, жесткости и точности изготовления подтверждена в процессе выполненных исследований модельных объектов. На основе комплекса рекомендаций спроектирован ряд пресс-форм для изготовления конкретных изделий. Данные пресс-формы в процессе изготовления деталей подтвердили высокие эксплуатационные качества.

**3. Исследование прочностных и жесткостных характеристик полуматриц реальных пресс-форм.** С использованием разработанного программного обеспечения проведен расчет напряженно-деформированного состояния полуматриц пресс-форм МДВ 0600.4003.000 и МДВ 0600.4004.000 (Харьковский НИИ технологии машиностроения). В расчетах полагалось: усилие закрытия пресс-форм  $Q = 2,5$  МН; давление впрыска расплавленной пластмассы  $p = 30$  МПа; усилие обжатия  $T = 12$  кН; модуль упругости материала полуматрицы  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,28$ .

Значения геометрических параметров, виды граничных условий для различных вариантов расчетных схем полуматриц сведены в табл.3.

Таблица 3

Геометрические характеристики полуматриц пресс-форм, мм

Пресс-форма	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	Граничные условия	T, кН
МДВ 0600.4003	360	280	280	200	60	20	1	-
	360	280	280	200	60	20	2	12
	360	280	280	120	60	20	2	12
	360	280	280	40	60	20	2	12
	360	280	280	200	60	20	2	6
	360	280	280	200	60	20	2	24
	360	280	280	200	60	20	2	36
МДВ 0600.4004	440	360	240	160	60	20	2	12
МДВ 0600.4004 двухместная, $\alpha_2=40$ мм	440	360	240	160	60	20	2	12

На примере пресс-форм МДВ 0600.4003 проведено исследование влияния вида граничных условий и габаритов изготавливаемой детали, а также усилий обжатия на напряженно-деформированное состояние полуматрицы. При расчетах пресс-форм МДВ 0600.4004 определилось влияние промежуточного ребра перегородки между стенками на жесткостные характеристики полуматрицы (на рис.11 приведена схема двухместной матрицы, отличие расчетной схемы которой от расчетной схемы одноместной заключается в наличии ребра, разделяющего формы для литья деталей).

На рис.12 приведена схема деформирования сечений полуматрицы пресс-формы МДВ 0600.4003 (вариант 2 табл.2). Видно, что максимальный прогиб полуматрицы достигается в средней части (63 мкм). Периферийные точки полуматрицы смещаются в направлении плоскости разреза полуматриц. В сечении  $x=0$  мм по внутреннему контуру сопряжения полуматриц происходит раскрытие стыка на 5 мкм. Раскрытие стыка по внешнему контуру сопряжения не наблюдается.

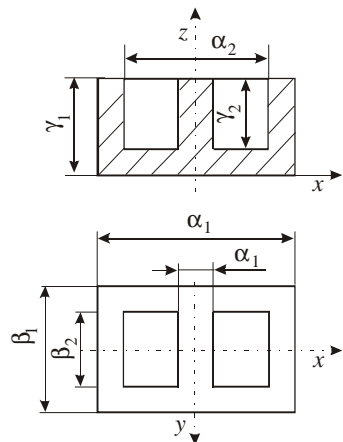


Рис.11. Основные конструктивные параметры двухместной полуматрицы

На рис.13 представлены схемы деформирования сечений  $x=0$  мм полуматриц пресс-формы МДВ 0600.4003 с различной толщиной стенки  $t = (\alpha_1 - \alpha_2)/2$ . Видно, что уменьшение габаритных размеров изготавливаемой детали (увеличение толщины стенки полуматрицы пресс-формы) приводит к изменению характера деформирования полуматрицы: прогибы ее центральной части сначала уменьшаются, а затем меняют знак.

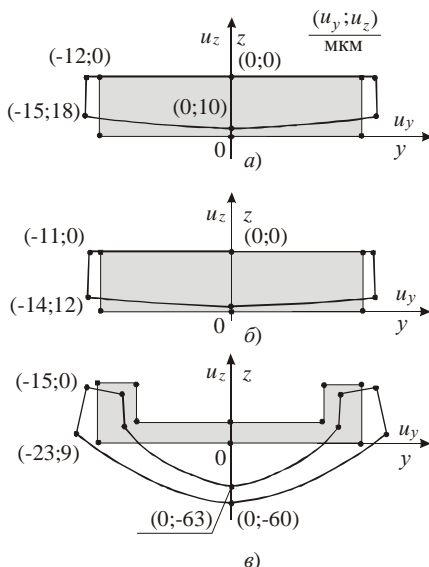


Рис.12. Схема деформирования сечений полуматрицы пресс-формы МДВ 0600.4003 (вариант 2 табл.2):  
а –  $x = -180$  мм; б –  $x = -140$  мм;  
в –  $x = 0$  мм

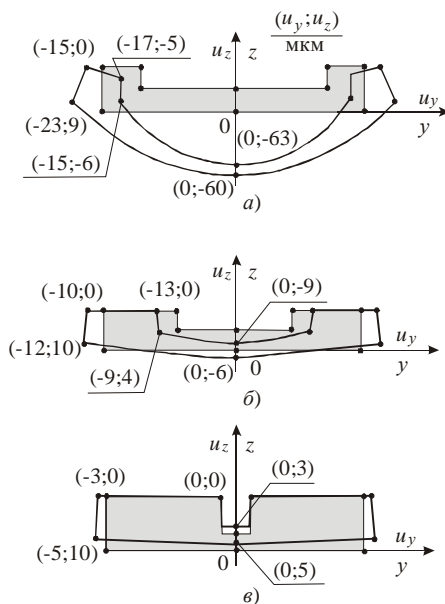


Рис.13. Схема деформирования сечений  $x = 0$  мм полуматрицы пресс-формы МДВ 0600.4003 с различной толщиной стенки:  
а –  $t = 40$  мм; б –  $t = 80$  мм; в –  
 $t = 120$  мм

На рис. 14 приведены схемы деформирования сечений  $x=0$  мм

полуматрицы пресс-формы МДВ 0600.4003 при варьировании усилия их обжатия системой наклонных винтов  $T$ . Номинальное усилие  $T = 12$  кН. Как следует из представленных рисунков, картина деформированного состояния полуматрицы незначительно меняется при приложении усилий обжатия.

Анализ полученных картин деформированного состояния полуматриц позволяет выделить параметры  $\Delta_1 \div \Delta_4$ , характеризующие их жесткость и аналогичные по смыслу приведенным в табл.2. В табл.4 сведены значения

параметров  $\Delta_1 \div \Delta_4$  для всех вариантов расчетных схем, указанных в табл.3 (за исключением варианта 10).

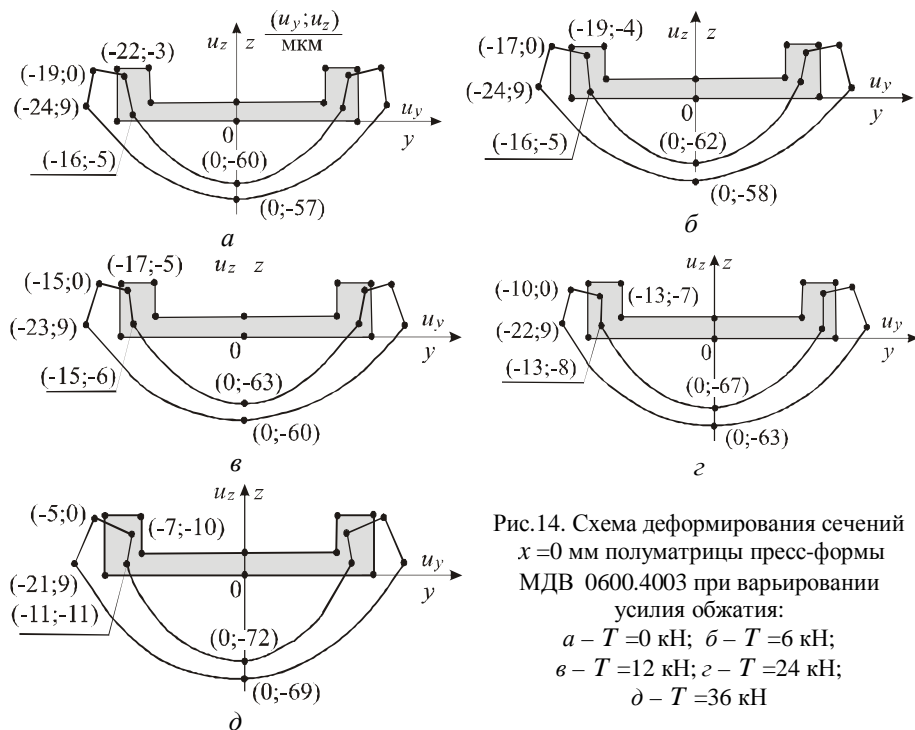


Рис.14. Схема деформирования сечений  $x=0$  мм полуматрицы пресс-формы МДВ 0600.4003 при варьировании усилия обжатия:  
 $a - T=0$  кН;  $б - T=6$  кН;  
 $в - T=12$  кН;  $г - T=24$  кН;  
 $д - T=36$  кН

Таблица 4  
 Параметры деформированного состояния полуматриц пресс-форм, мкм

Пресс-форма	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$\Delta_4$
МДВ 0600.4003	61	3	0	27
	64	5	0	25
	9	0	0	13
	3	0	0	6
	62	4	0	26
	67	7	0	24
	72	10	0	23
	60	0	0	27
МДВ 0600.4004	57	0	0	25

Как видно из представленных на рис.12-14 и в табл.4 результатов

численных исследований, характер деформирования полуматриц от вида граничных условий и усилий обжатия системой наклонных винтов зависит незначительно. Максимальный прогиб достигается в центральной части полуматрицы и составляет  $57 \div 72$  мкм. Раскрытия по внешнему контуру плоскости сопряжения полуматриц не происходит. Раскрытие стыка по внутреннему контуру составляет  $3 \div 10$  мкм, а у полуматрицы пресс-формы МДВ 0600.4004, а также МДВ 0600.4083 при 3-м варианте граничных условий, не происходит.

Уменьшение габаритов изготавливаемой детали резко снижает прогибы дна (с 64 мкм до  $3 \div 9$  мкм), величину распираания боковых стенок (с 25 мкм до  $6 \div 13$  мкм), а также приводит к отсутствию раскрытия стыка по всей плоскости сопряжения полуматриц.

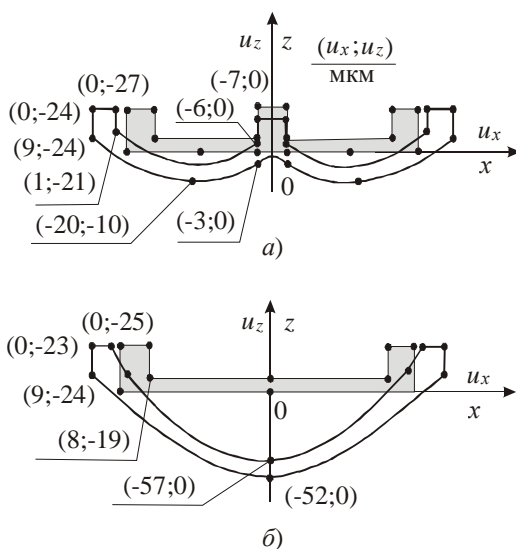


Рис.15. Схема деформирования сечений  $x=0$  мм полуматрицы пресс-формы МДВ 0600.4004 (двухместный и одноместный варианты)

На рис.15 приведена схема деформирования сечений  $x=0$  мм полуматрицы пресс-формы МДВ 0600.4004 (двухмест-ный и одноместный варианты). Видно, что наличие разделяющей перегородки существенно изменяет характер и наличие прогиба дна. В одноместной полуматрице прогиб дна имеет выраженный максимум в центральной части. В двухместной полуматрице максимумы прогибов наблюдаются в зоне центральных частей формирующих полостей. Максимальный прогиб дна одноместной полуматрицы составляет 57 мкм, двухместной – 20 мкм.

Для напряженного состояния полуматриц пресс-форм характерно



преобладание осевых напряжений. Так, в полуматрице пресс-форм (см. табл. 4, вариант 1 расчетной схемы) максимальные осевые напряжения имеют величины:  $\sigma_x=94$  МПа,  $\sigma_y=74$  МПа,  $\sigma_z=73$  МПа; касательные –  $\tau_{xy}=22$  МПа,  $\tau_{yz}=45$  МПа,  $\tau_{zx}=38$  МПа, а эквивалентные  $\sigma_y=121$  МПа.

Таким образом, напряжения в полуматрицах имеют невысокий уровень по сравнению с допускаемыми для большинства инструментальных сталей, применяемых для их изготовления (X12M, Y8A, Y10A и др.), величины которых составляют не менее 250 МПа. В связи с этим требование прочности полуматриц заведомо удовлетворяется, и уровень напряжений не является определяющим для исследованных конструкций.

Анализ описанных выше исследований позволяет выделить следующие характерные особенности их напряженно-деформированного состояния.

1. Величина перемещений и характер деформирования исследованных полуматриц практически одинаковы для различных вариантов их крепления на подкладной плите.

2. Для напряженного состояния полуматриц характерен относительно невысокий уровень напряжений по сравнению с допускаемыми, в связи с чем критерий прочности не является определяющим для гаммы исследованных полуматриц.

3. Усилия обжатия полуматриц до трехкратной (по сравнению с номинальной) величины приводят к незначительному (до 10%) уменьшению распирания боковых стенок, увеличению примерно на 20% прогибов центральной части днища и росту в 3 раза раскрытия стыка по внутреннему контуру плоскости сопряжения полуматриц.

4. Уменьшение габаритов формирующей полости в полуматрице от уровня  $(5/7 \div 7/9)$  до  $(1/7 \div 1/3)$  габаритных размеров полуматрицы в плане приводит к уменьшению в 21 раз прогибов в центральной части, снижению в 4 раза распирания боковых стенок и устранению раскрытия стыка по всей плоскости сопряжения полуматриц.

5. Наличие в полуматрице перегородки между формируемыми полостями приводит к изменению характера ее деформирования и существенному уменьшению прогибов днища. Так, прогиб днища полуматрицы пресс-форм МДВ 0600.4004 (двухместный вариант) в 2,5 раза меньше, чем для одноместного варианта.

6. Раскрытие стыка по периферии плоскости сопряжения полуматриц исследованных пресс-форм не происходит.

4. **Экспериментальное исследование пресс-форм.** Одним из важнейших этапов разработки конструкций и определения работоспособности пресс-форм является экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния наиболее ответственных и нагруженных элементов конструкций (подкладных плит, опор, обойм и полуматриц). Это вызвано тем, что данные детали воспринимают действие

значительных по величине усилий закрытия пресс-форм и давления расплавленной пластмассы (рабочего тела), что приводит к их деформации и может приводить к раскрытию стыков в полуматрицах. Последнее может явиться причиной брака. С использованием предложенных в работе методов, схем измерений и расшифровки было проведено исследование напряженно-деформированного состояния опытных образцов пресс-форм методом спекл-голографической интерферометрии.

Таблица 5

Варианты сочетания конструктивных и эксплуатационных параметров

№ голограммы	Плоскость записи	Изменения в конструкции	Перепад нагрузки, кН	Внутр. давление, МПа
1	$Oy$	винты не касаются, опоры отсутствуют	$250 \div 330$	2,45
2	$Ox$	винты затянуты, установлены две опоры 62,39 мм	$1000 \div 875$	9,80
3	$Oy$	винты затянуты, установлены две опоры 62,39 мм	$1000 \div 875$	9,80
4 (матрица)	$Ox$		$50 \div 20$	0

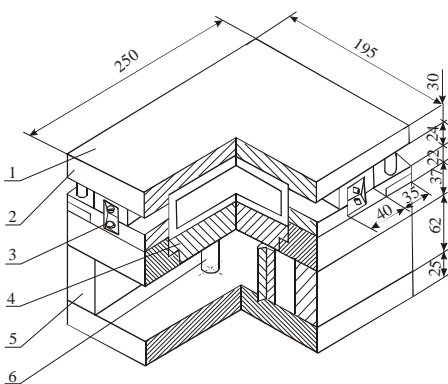


Рис.16. Конструкция блока пресс-форм:  
1 – матрица; 2 – верхняя плита; 3 – винты для закрепления формующей вставки;  
4 – подкладная плита; 5 – опоры;  
6 – дополнительные опоры

Варианты сочетания конструктивных и эксплуатационных параметров при экспериментальном исследовании НДС пресс-форм приведены в табл.5.

Для определения рациональных геометрических параметров и конструктивных решений блоков пресс-форм (рис.16, 17) и матриц (рис.18, 19) методами голографической и спекл-интерферометрии проведено определение картин их деформированного состояния.

При этом в качестве основных варьируемых обобщенных параметров были выбраны способы закрепления формующей вставки и дополнительных опор,

оказывающие влияние на напряженно-деформированное состояние пресс-форм.

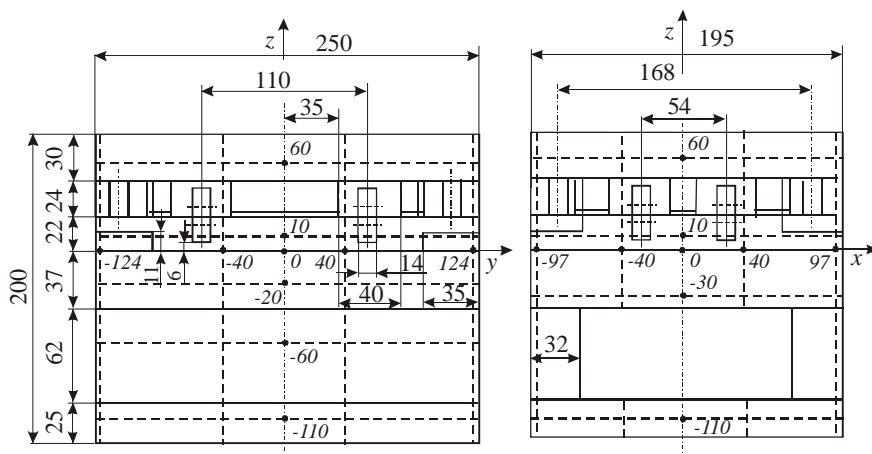


Рис.17. Проекция пресс-формы на плоскости  $yz$  и  $xz$

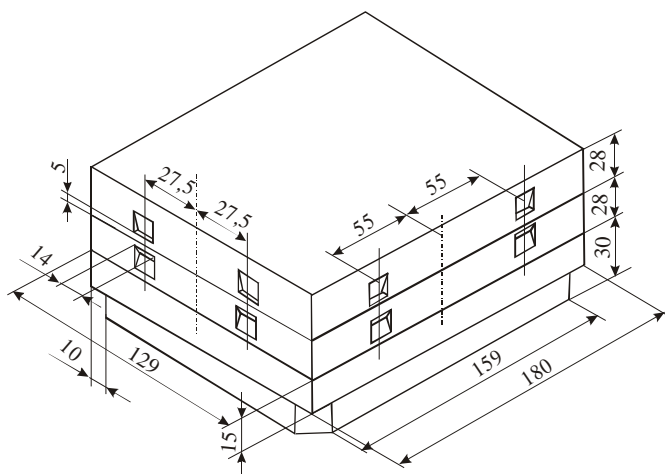


Рис.18. Конструкция матрицы

На рис.20 представлены интерферограммы, характеризующие деформированное состояние блока пресс-формы. На рис.21-27 – картины расшифровки некоторых полученных интерферограмм.

Анализ поведения элементов пресс-формы при варьировании схем нагружения и сопряжения позволяет отметить следующие особенности.

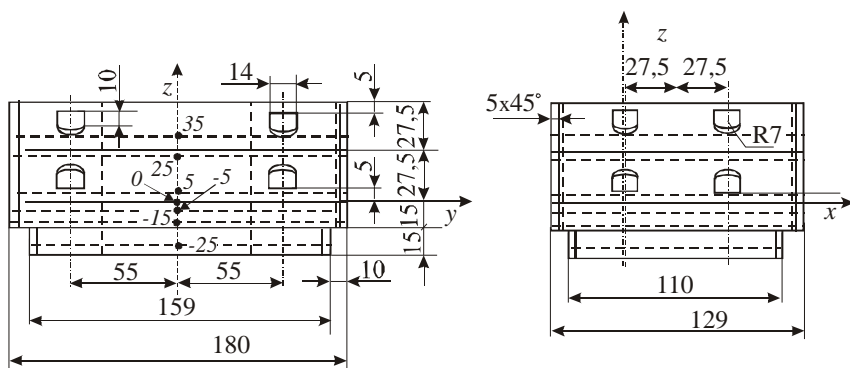


Рис.19. Проекция матрицы на плоскости  $yz$  и  $xz$

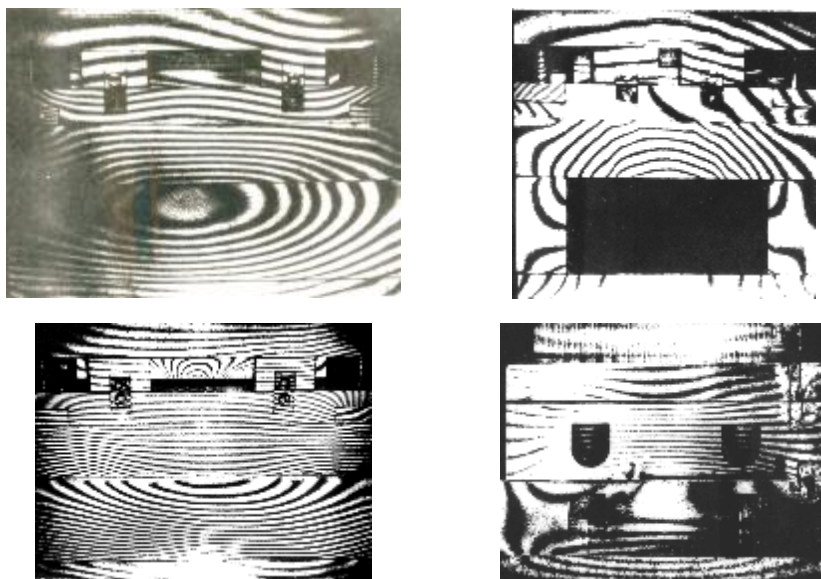


Рис.20. Примеры голографических интерферограмм блока пресс-формы

1. В целом деформированное состояние внешних поверхностей пресс-формы достаточно слабо зависит от наличия промежуточных опор и усилий закрепления полуматриц боковыми винтами.

2. По плоскостям сопряжения элементов пресс-форм, в том числе полуматриц, наблюдаются разрывы перемещений, что свидетельствует о необходимости рассмотрения пресс-формы как сложной механической системы контактирующих друг с другом элементов.

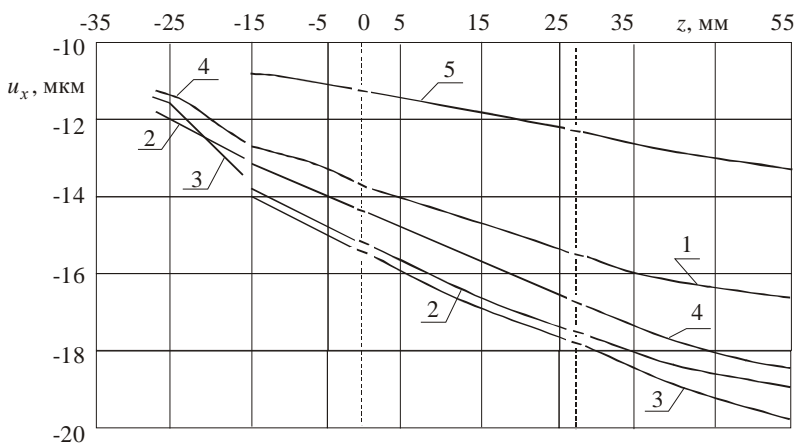


Рис.21. Распределение перемещений  $u_x$  точек поверхности матрицы вдоль оси  $z$  (голограмма № 4 в табл.5):  
1 –  $x=60$  мм; 2 –  $x=20$  мм; 3 –  $x=0$  мм; 4 –  $x=-20$  мм; 5 –  $x=-60$  мм

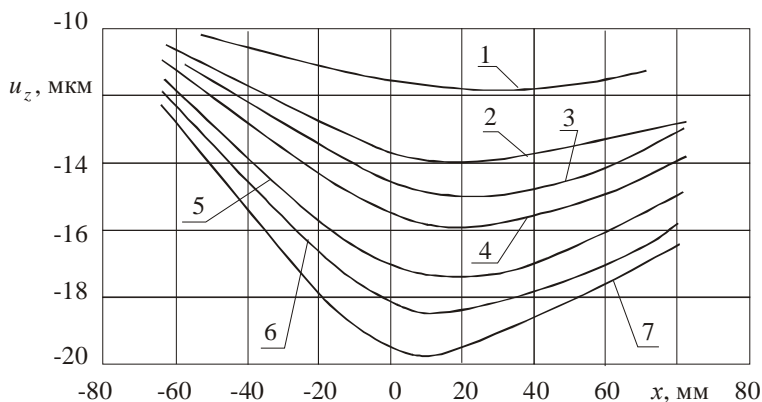


Рис.22. Распределение перемещений  $u_y$  (б) точек поверхности матрицы вдоль оси  $z$  (голограмма № 4 в табл.5):  
1 –  $x=60$  мм; 2 –  $x=20$  мм; 3 –  $x=0$  мм; 4 –  $x=-20$  мм; 5 –  $x=-60$  мм

3. На картине интерференционных полос отсутствуют зоны резких градиентов, что позволяет создавать конечно-элементные модели элементов пресс-форм без зон резких изменений размеров конечных элементов.

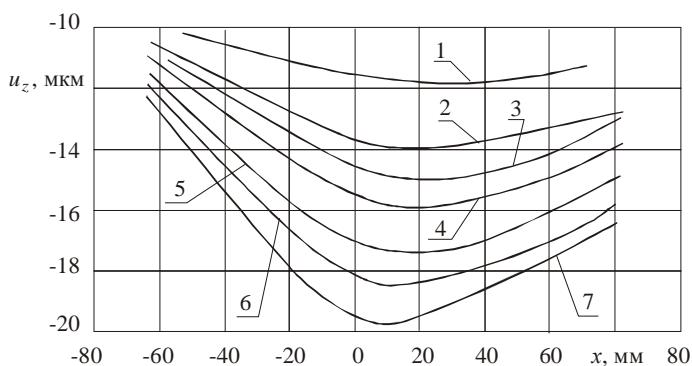


Рис.23. Распределение перемещений  $u_x$  точек поверхности матрицы вдоль оси  $x$  (голограмма № 14 в табл.5): 1 –  $z = -25$  мм; 2 –  $z = -15$  мм; 3 –  $z = -5$  мм; 4 –  $z = 5$  мм; 5 –  $z = 25$  мм; 6 –  $z = 35$  мм; 7 –  $z = 55$  мм

**5. Интегрированная система комплексного автоматизированного исследования пресс-форм.** На основе комплекса проведенных численных и экспериментальных исследований элементов пресс-форм, возможно выявление значимых факторов пресс-форм с точки зрения определения их прочностных, жесткостных и точностных характеристик, в связи с чем появилась возможность создания качественно новой системы автоматизированного анализа напряженно-деформированного состояния и синтеза рациональных конструктивных и технологических параметров “СААС-ПФ”. Данная система является основой создания полноценной комплексной системы моделирования конструкций и физико-механических процессов в пресс-формах. Для нее *характерны*:

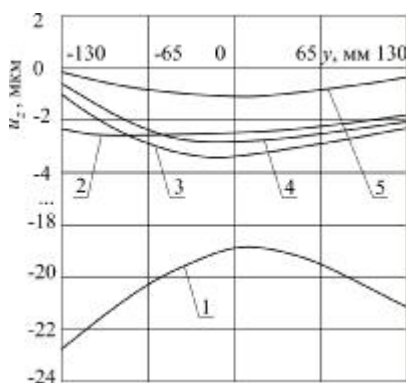


Рис.24. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $y$  (голограмма № 3 в табл.5): 1 –  $z = 60$  мм; 2 –  $z = 10$  мм; 3 –  $z = -20$  мм; 4 –  $z = -60$  мм; 5 –  $z = -110$  мм

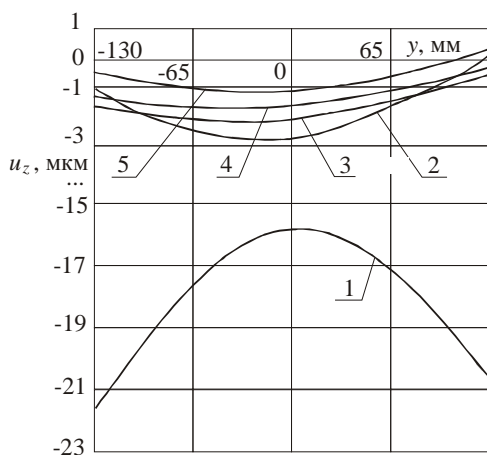


Рис.25. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $x$  (голограмма № 1 в табл.5): 1 –  $z = 60$  мм; 2 –  $z = 10$  мм; 3 –  $z = -20$  мм; 4 –  $z = -60$  мм; 5 –  $z = -110$  мм

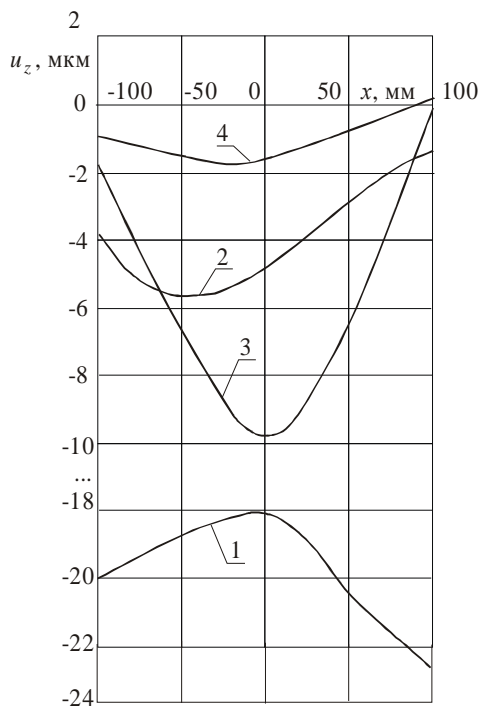


Рис.26. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $x$  (голограмма № 12 в табл.5): 1 –  $z = 60$  мм; 2 –  $z = 15$  мм; 3 –  $z = -30$  мм; 4 –  $z = -110$  мм

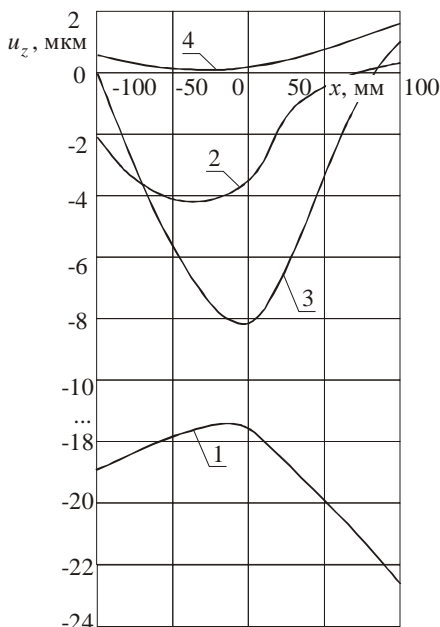


Рис.27. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы

вдоль оси  $x$  (голограмма № 10 в табл.5):

1 –  $z=60$  мм; 2 –  $z=15$  мм; 3 –  $z=-30$  мм; 4 –  $z=-110$  мм

- соединение преимуществ специализированной и универсальных CAD/CAM/CAE-систем;
- использование обобщенного параметрического подхода как основы для описания геометрии, физико-механических процессов и параметров численных моделей;
- расчетно-экспериментальное обоснование используемых количественных и качественных параметров численных моделей элементов пресс-форм;
- полнофункциональность как с точки зрения полноты охвата конструктивных элементов, так и условий их контактного взаимодействия;
- комплексность подхода, который позволяет исследовать и силовое воздействие от литейной машины, и давление рабочего материала в формирующих полостях, а также учитывать тепловое воздействие данного материала и системы охлаждения.

Разработанная “СААС-ПФ” является основой для создания отечественной комплексной системы автоматизированного проектирования, исследования и технологической подготовки производства, отличительными характеристиками которой являются:



- широкие возможности моделирования;
- встроенная база данных и знаний;
- учет специфики конструкций, сортамента и свойств используемых материалов;
- учет технологического оборудования и оснастки предприятий отечественного машиностроения.

На рис. 28 и в табл. 6, 7 представлены иллюстрации отдельных этапов моделирования и исследования пресс-форм с использованием “СААС-ПФ”.

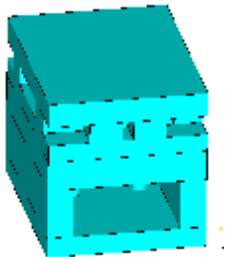
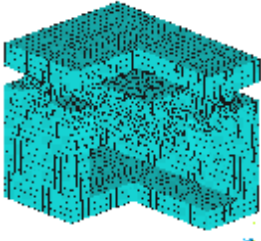
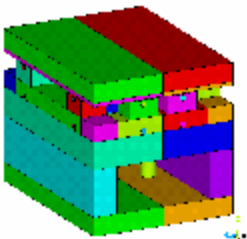
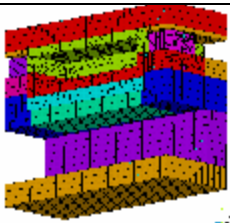
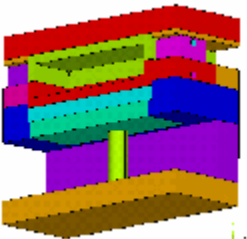
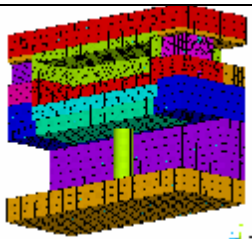


Рис.28. Структура “СААС-ПФ”

**Заключение.** Анализ результатов свидетельствует о качественном соответствии результатов исследований данным, полученным в ходе экспериментальных исследований. При этом погрешность по перемещениям не превышает 10-15% для различных вариантов сочетания параметров. Это позволяет заключить, что разработанная система автоматизированного анализа и синтеза расчетных моделей и элементов конструкций пресс-форм является эффективным инструментом, позволяющим оперативно и с высокой степенью достоверности решать комплекс задач, возникающих при проектировании пресс-форм. Данная система впитала в себя результаты огромного числа численных и экспериментальных исследований и отражает

важнейшие направления развития CAD/CAM/CAE-систем в отечественном машиностроении: высокая степень интеллектуализации; учет специфики проектируемых изделий; возможность накопления баз знаний; обеспечение работоспособности и точности изготовления изделий; сквозная параметризация и возможность экспорта/импорта в/из различных систем автоматизированного проектирования.

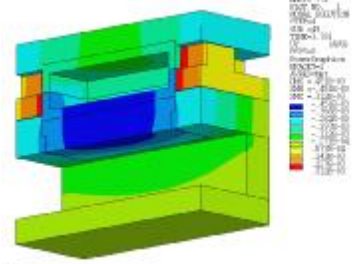
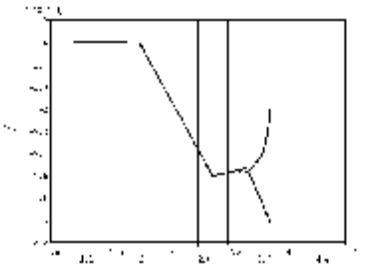
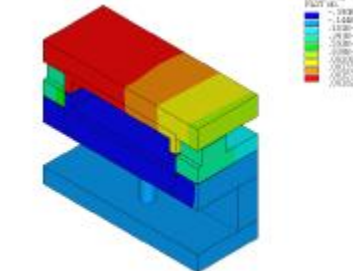
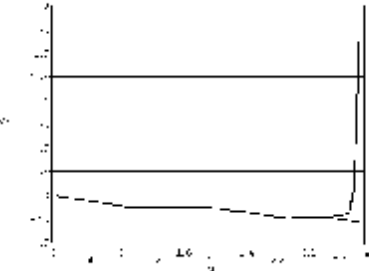
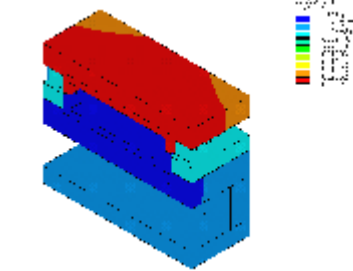
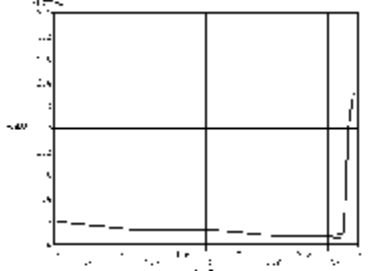
Таблица 6  
Этапы моделирования элементов пресс-форм

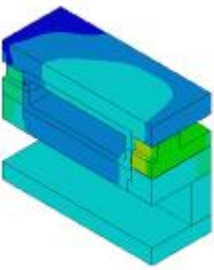
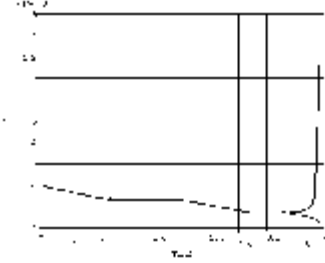
	Название этапа	
	<i>Параметрические геометрические модели</i>	<i>Параметрические конечно-элементные модели</i>
<i>Получаемые после выполнения этапа результаты исследований</i>		
		
		

Предложенная система решает проблему снижения стоимости, повышения оперативности и обеспечения точности изготовления деталей транспортных средств специального назначения на предприятиях отечественного машиностроения.

Таблица 7

Этапы исследования напряженно-деформированного состояния элементов пресс-форм

<i>Картина распределения осевых перемещений</i>	<i>Зависимость перемещений точек в сопряжении полуматриц в процессе нагружения усилиями закрытия пресс-формы, обжатия винтами и давления впрыска рабочего тела</i>
	
	
	

<i>Картина распределения осевых перемещений</i>	<i>Зависимость перемещений точек в сопряжении полуматриц в процессе нагружения усилиями закрытия пресс-формы, обжатия винтами и давления впрыска рабочего тела</i>
	

В дальнейшем требуется проведение подробных исследований влияния различных параметров напряженно-деформированного состояния элементов пресс-форм и расширение функциональных возможностей автоматизированной системы их анализа и синтеза.

**Список литературы.** 1. Сеа Ж. Оптимизация. Теория и алгоритмы. – М.: Мир, 1973. – 244 с. 2. Черноусько Ф.Л., Баничук Н.В. Вариационные задачи механики и управления. – М.: Наука, 1973. – 240 с. 3. Кравчук А.С. К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров // Прикл. мат. и мех. – 1977. – Т.41. – Вып.2. – С.329–337. 4. Кравчук А.С. К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров – // Доклады АН СССР, 1976. – Т.230. – № 2. – С.308–310. 5. Кравчук А.С., Васильев В.А. Численные методы решения контактных задач для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров // Прикладная механика. – 1980. – Т.16. – Вып.6. – С.9–15. 6. Кравчук А.С., Васильев В.А. Вариационный метод в контактной задаче теории упругости / В кн. Упругость и неупругость. – М.: Наука, 1978. – С.23–31. 7. Кравчук А.С. Постановка задачи о контакте нескольких деформируемых тел как задачи нелинейного программирования // Прикл. мат. и мех. – 1978. – Т.42. – Вып.3. – С.466–474. 8. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1980. – 536 с. 9. Кравчук А.С., Сурсяков В.А. Численное решение геометрически нелинейных контактных задач. // Доклады АН СССР, 1981. – Т.259. – №6. – С.1327–1329. 10. Гловачек И., Ганслингер Я., Нечас И., Ловишек Я. Решение вариационных неравенств в механике. – М.: Мир, 1986. – 270 с. 11. Дюво Г., Лионс Ж.Л. Неравенства в механике и физике. – М.: Наука, 1980. – 384 с. 12. Лионс Ж.Л. Некоторые методы решения нелинейных краевых задач. – М.: Мир, 1972. – 587 с. 13. Капустин Н.М., Заяренко Е.И., Капустин А.А., Ткачук Н.А. Исследование прочностных и жесткостных характеристик элементов переналаживаемых приспособлений для станков с ЧПУ. – Отраслевой сборник. Серия 2, 1987, вып. 7 (193), С.42–47. 14. Ткачук Н.А. Деформация элементов переналаживаемых приспособлений при обработке деталей на станках фрезерно-сверлильной группы // Вопросы оборонной техники. – 1987. – Сер.2, вып. 7 (193). – С.47–50. 15. Кузнецова Л.Г., Кирилов Б.В., Притыченко В.И. Экспериментальное исследование прочности и жесткости подкладных плит и полуматриц пресс-форм. – Научно-технический сборник “Оборонная техника”. “Технологическая оснастка

для ускоренной подготовки производства”. – М.: “Информтехника”. – 1994.– № 12. – С.38-40.

**15.** *Ткачук Н.А.* Интенсивная схема экспериментальных исследований элементов технологических систем // Сб. научн. тр. “Динамика и прочность машин”. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – вып.56.– С.175-181. **16.** *Ткачук Н.А.* Экспериментальное определение параметров конечно-элементных моделей // Механіка та машинобудування. – 1998. – № 1. – С.68-75.

**17.** *Капустин А.А., Ткачук Н.А.* Расчетно-экспериментальный метод исследования деформаций элементов механических систем // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ – 1999.– вып.53.– С.148-155. **18.** *Ткачук Н.А.* Комбинированные расчетно-экспериментальные методы исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов технологических систем // Механіка та машинобудування. – 1999. – № 1.– С.37-46. **19.** *Ткачук Н.А.* Экспериментальное определение характера граничных условий в сложных механических системах // Механіка та машинобудування. – 2000. – № 1. – С.28-34. **20.** *Ткачук Н.А.* Элементы технологических систем: компьютерные модели, экспериментальные исследования, численный анализ прочности и жесткости // Вісник Інженерної Академії України. – Київ.– 2001.– № 3 (част.2). – С.297-302. **21.** *Ткачук Н.А.* Расчетно-экспериментальный метод исследования напряженно-деформированного состояния элементов транспортных средств и технологических систем // Вісник Державного технічного університету сільського господарства. Тематичний випуск: “Механізація сільськогосподарського виробництва”. Збірник наукових праць Державного технічного університету сільського господарства. – Харків: ХДТУСГ, 2003.– вип.21. – С.20-29.

*Поступила в редколлегию 12.12.2005*